内侧腓肠肌-跟腱复合体形态学和力学特性的性别差异研究

邓力勤,张希妮,肖松林,傅维杰

(上海体育学院运动健身科技省部共建教育部重点实验室,200438 上海)

摘　要:旨在探讨体内侧腓肠肌-跟腱复合体的形态学和力学特性的性别差异。招募并选取无训练经历且无规律运动习惯的健康男性和女性各18名。使用超声系统和数字化触诊仪分别测量或间接计算内侧腓肠肌和跟腱的形态学和力学特性。采用独立样本 *t* 检验以及 Mann-Whitney U 检验分析内侧腓肠肌和跟腱的形态学和力学特性的性别差异。结果表明:相比于女性,男性的内侧腓肠肌羽状角、厚度均更大,但是肌束长度无显著性别差异;相比于女性,男性的跟腱长度更长且跟腱横截面积更大;相比于女性,男性的内侧腓肠肌垂直刚度较大,对数衰减值较小;跟腱的垂直刚度和对数衰减值无显著性别差异。据此,内侧腓肠肌-跟腱复合体的形态学和力学特性具有显著性别差异。

关键词:性别;内侧腓肠肌;跟腱;形态学;力学特性

中图分类号:G804.2　　　　**文献标志码:**A

Differences in morphological and mechanical properties of medial gastrocnemius-achilles tendon unit between males and females

DENG Liqin, ZHANG Xini, XIAO Songlin, FU Weijie

(Key Laboratory of Exercise and Health Sciences of Ministry of Education, Shanghai University of Sport, 200438 Shanghai, China)

Abstract: This study aimed to explore whether there are sex-based differences in the morphological and mechanical properties of the gastrocnemius muscle- tendon unit (gMTU). We recruited 18 healthy male and 18 healthy female adults with no training experience or no regular exercise habits. The ultrasonography system and digital MyotonPro were used to measure the architectural and mechanical properties of the gMTU, respectively. An independent *t*-test was utilized to quantify the sex-based differences in the morphological and mechanical properties of the gMTU. The results are as follows: The MG pennation angle and thickness were greater in the males than in the females, while no significant gender difference was observed in MG fascicle length; the males possessed greater length and CSA of the AT than females; the females possessed lower MG vertical stiffness and greater logarithmic decrement than the males; and there was no significant difference in AT vertical stiffness and logarithmic decrement between the males and the

收稿日期:2021-04-12　　　　**修回日期:**2021-12-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11772201; No. 11932013);国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项(No. 2019YFF0302100);第六批上海市青年拔尖人才开发计划;上海市“曙光学者”计划(No. 19SG47)

通信作者:傅维杰,教授。E-mail: fuweijie@sus.edu.cn

引用格式:邓力勤,张希妮,肖松林,等. 内侧腓肠肌-跟腱复合体形态学和力学特性的性别差异研究[J]. 应用力学学报,2022,39(2):218-223.

DENG Liqin, ZHANG Xini, XIAO Songlin, et al. Differences in morphological and mechanical properties of medial gastrocnemius-achilles tendon unit between males and females[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(2): 218-223.

females. Thus, morphological and mechanical properties of the gMTU significantly differ between the two genders.

Key words: sex; medial gastrocnemius; achilles tendon; architecture; mechanical property

内侧腓肠肌-跟腱复合体(gastronemius muscle-tendon unit, gMTU)是人体中最强壮但却最常受损的肌肉-肌腱复合体之一[1-4],由内侧腓肠肌和跟腱构成。一方面 gMTU 在走、跑、跳等动作的支撑期的蹬伸阶段起着产生力量、储存和释放机械能的重要作用[5]。另一方面,小腿三头肌疼痛/损伤以及跟腱损伤常见于各项运动中[6-8]。其中,gMTU 的形态学和力学特性(如跟腱刚度、长度、内侧腓肠肌肌束长度和羽状角)不仅反映身体素质水平和运动表现,而且与肌肉和跟腱损伤风险有关[9-13]。

性别是影响身体素质和运动表现的一个重要因素。具体而言,现有研究表明,与年轻女性相比,年轻男性的整体身体素质的 z 分数(定义为原始分数与团体的平均数之差除以标准差所得的商数)更高[14]。同时,男性在以下肢力量、速度和耐力为导向的项目中有更好的运动表现[15-17]。由于身体机能在健康中的重要作用[18],性别之间身体机能差异引起的机制值得研究。因此,本研究探讨了 gMTU 的形态学和力学特性是否能解释男性更优的身体素质和运动表现的生物力学机制。由此,可进一步针对相比于男性,女性的单个 gMTU 形态学和力学特性的差异,以科学地推荐运动/训练方法,弥补在以力量、速度和耐力为导向的身体素质和运动表现的弱势。

与此同时,前人研究报道女性肌肉骨骼损伤(如足部疼痛、跟腱病或髌骨疼痛综合征等)的发病率高于男性[19],且女性运动员的跟腱损伤的复发率均高于男运动员[20]。然而,也有研究者发现,男性的跟腱和小腿三头肌损伤的发生率略高于女性[19,21]。这种不一致可能部分归因于受试者纳入标准的制定,如 Kvist 等[20]认为男性的体育运动参与率较高是男性跟腱损伤更多的原因。影响内侧腓肠肌和跟腱损伤发生率的单纯性别因素尚不清楚。因此,本研究招募了没有训练经验和无规律锻炼习惯的男性和女性,以期为内侧腓肠肌和跟腱损伤风险的性别差异研究提供参考,为易损伤的性别群体提供特定训练方式[8,22]。

本研究的目的是探讨体内侧腓肠肌肌束长度、羽状角、厚度、垂直刚度、对数衰减值、跟腱长度、横截面积(cross-sectional area, CSA)、垂直刚度以及对数衰减值的性别差异。本研究假设:相比于女性,男性的内侧腓肠肌肌束长度、羽状角和厚度更大/长;男性的跟腱长度和横截面积更大/长;男性的内侧腓肠肌和跟腱垂直刚度更大;男性的内侧腓肠肌和跟腱的对数衰减值更低。

1 研究对象与方法

1.1 实验对象

为了排除训练和规律锻炼后不同性别对不同运动适应情况,本研究招募无训练经历和规律运动习惯的健康男性和女性各 18 名(表 1)。样本量采用 G* power 软件(Version 3.1.9.6,德国)计算。样本量计算结果显示每组需 14 名受试者(效应量 1.14;显著性水平 0.05;效能 80%)[15]。本研究受试者排除标准为:①6 个月内有下肢损伤;②有或有过跟腱、内侧腓肠肌损伤以及神经系统疾病;③曾经参加过任何体育项目训练经历;④有长期规律运动习惯。本研究要求受试者在实验前 24 h 内避免剧烈运动且测试前不做任何准备活动。所有参与实验的受试者均签署了由校伦理委员会批准的知情同意书(No. 2017007)。

表 1 受试者基本情况($\bar{X} \pm SD$)

Tab. 1 Basic information of subjects($\bar{X} \pm SD$)

组别	人数	年龄/岁	身高/cm	体质量/kg
男性	18	24.4±2.1	175±3.9	69.7±7.3
女性	18	25.1±1.6	161.6±4.3	52.8±5.4
P 值		0.261	<0.001	<0.001

1.2 实验流程

1.2.1 形态学特性测量

首先使用软尺测量受试者处于坐位时的小腿长度(从胫骨内侧髁到踝关节内侧髁),测量时踝关节处于中立位,髋关节和膝关节屈曲 90°[23]。在确定内侧腓肠肌肌腹的位置后(腘窝褶皱和内踝连线的 30% 位置处),要求受试者俯卧在治疗床上,踝关节处于中立位(踝关节与小腿呈 90°)并且放松全身肌肉[24]。使用有线阵探头(L6-14)的 M7 超声系统

(Mindray,中国)以确定跟腱插入点位置以及内侧腓肠肌和跟腱结合点的位置,这两点之间的距离即跟腱长度。随后在跟腱上内外踝连线中点位置测量优势腿跟腱 CSA,然后使用超声置于优势腿内侧腓肠肌肌腹以测量内侧腓肠肌肌束长度、羽状角、厚度。优势腿被定义为受试者尽全力踢球时的踢球腿,本研究中,所有受试者的优势腿均为右腿[25]。

1.2.2 力学特性测量

使用 MyotonPro 数字化触诊仪(Myoton AS, Tallinn, Estonia)测量优势腿的内侧腓肠肌肌腹和跟腱插入点上方 3 cm 处的垂直刚度(垂直于跟腱以及肌肉走向上的刚度,代表了软组织抵抗形变的能力[2])以及对数衰减值(代表机械能的损耗[26])[27]。MyotonPro 数字化触诊仪已经被证实在静息状态下测量内侧腓肠肌和跟腱的力学特性具有较高的信度和效度[28]。在测试过程中,MyotonPro 探针需要垂直于内侧腓肠肌和跟腱的测量区域,探针振动 3 次,变异系数小于 3% 则认为采集成功[29]。

为了减小误差,所有形态学和力学特性的测量都由同一实验人员完成。

1.3 数据分析

超声的图像通过 Image J 软件进行分析(版本 1.53, NIH,美国)。内侧腓肠肌肌束长度为浅筋膜和深筋膜之间的肌束的距离[24]。羽状角为肌束和深筋膜之间的夹角,厚度为深筋膜和浅筋膜之间的距离[24]。跟腱横截面积为超声图像中较浅类椭圆形状的区域,如图 1 所示。

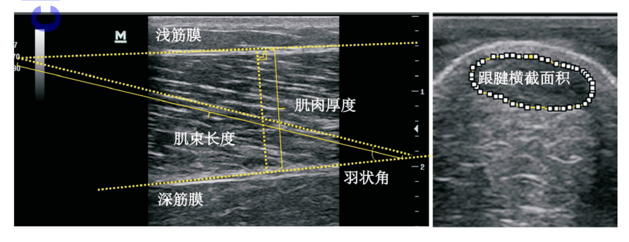


图 1 内侧腓肠肌(左)与跟腱(右)形态学超声影像图

Fig. 1 The ultrasound image of medial gastrocnemius and Achilles tendon

通过 MyotonPro 内置算法可以直接获得跟腱和内侧腓肠肌的垂直刚度和对数衰减值[30]。其中垂直刚度计算公式为

$$S = \frac{(a_{max} \cdot m_{probe})}{\Delta L} \qquad (1)$$

式中:S 为垂直刚度;a_{max} 为峰值加速度;m_{probe} 为探头的质量;ΔL 为探头触到测量点后在软组织的距离。

对数衰减值的公式为

$$D = \ln\left(\frac{a_{max}}{a_{sub}}\right) \qquad (2)$$

式中:D 为对数衰减值;a_{max} 为峰值加速度,a_{sub} 为次最大加速度。

1.4 统计分析

所有数据使用 SPSS 软件(IBM, version 21.0, Armonk, USA)进行统计。首先,采用 Shapiro-Wilk 测试来检验各数据分布的正态性。如果数据是正态分布的,则使用独立 t 检验来量化 gMTU 的形态学特性和力学特性是否存在性别差异。否则,使用 Mann-Whitney U 检验。所有结果均以均数 ± 标准差表示。显著性水平设为 0.05。

2 结 果

2.1 gMTU 的形态学特性

除了男性的内侧腓肠肌肌束长度和跟腱横截面积之外,其他形态学指标均符合正态分布。相比于女性,男性的内侧腓肠肌羽状角、厚度更大($P < 0.001$;$P = 0.001$,图 2)。但内侧腓肠肌肌束长度无显著性别差异($P = 0.226$,图 2)。此外,相比于女性,男性的跟腱长度更长且跟腱 CSA 显著大于女性($P = 0.005$;$P = 0.001$,图 3)。

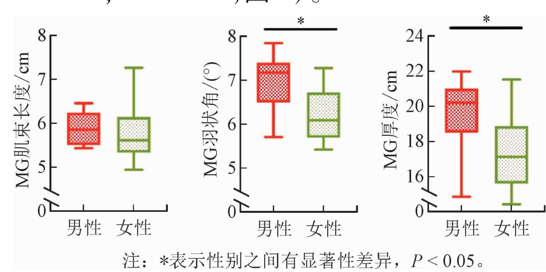


图 2 男性和女性的内侧腓肠肌(MG)形态学特征

Fig. 2 The architecture of medial gastrocnemius (MG) of males and females

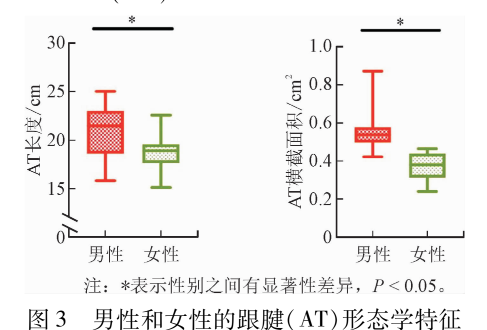


图 3 男性和女性的跟腱(AT)形态学特征

Fig. 3 The architecture of Achilles tendon (AT) of males and females

2.2 gMTU 的力学特性

所有 gMTU 的力学特性指标均符合正态分布。内侧腓肠肌力学特性中，相比于女性，男性的内侧腓肠肌垂直刚度更高（$P = 0.002$，图 4），对数衰减值更小（$P = 0.001$，图 4）。然而，男性和女性的跟腱垂直刚度和对数衰减值没有显著差异（$P = 0.695$；$P = 0.164$，图 4）。

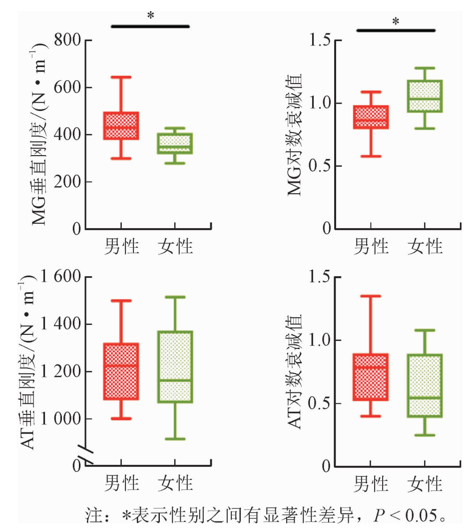


图 4 男性和女性的内侧腓肠肌（MG）和跟腱（AT）力学特性

Fig. 4 The mechanical properties of medial gastrocnemius (MG) and Achilles tendon (AT) of males and females

3 讨 论

本研究旨在探究 gMTU 形态学和力学特性的性别差异。与研究假设一致，相比于女性，形态学特性上，男性的内侧腓肠肌羽状角、厚度、CSA 更大且跟腱长度更长。力学特性中男性的内侧腓肠肌的垂直刚度更大，对数衰减值更低。但是，与假设不符的是，内侧腓肠肌肌束长度和所有跟腱的力学特性没有明显的性别差异。

研究表明，男性的内侧腓肠肌羽状角、厚度比女性的更大。类似地，前人研究结果显示，男性和女性的内侧腓肠肌肌束长度相似，而男性的内侧腓肠肌厚度和羽状角显著大于女性[15,31-33]。这可能是由于男性的睾酮水平要高于女性，睾酮可以刺激肌肉蛋白质合成代谢[34]。此外，由于内侧腓肠肌作为支撑期蹬伸阶段最大贡献肌肉之一，本研究发现的性别间体质量的显著差异意味着男性需要更尽力地收缩内侧腓肠肌以在走路、跑步等动作中实现蹬伸，这可能有利于肌肉的肥大。据报道，内侧腓肠肌的形态学（羽状角、肌肉厚度）与肌肉峰值力量、踝关节力矩力量、峰值功率、短跑成绩、跑步经济性（跑步时次最大摄氧量更少）等指标成正相关[35-37]。基于以上研究，本研究的性别间的内侧腓肠肌形态学差异的结果从解剖和生物力学的角度解释了男性在以下肢力量、速度和耐力为导向的身体素质项目和运动项目中表现更好这一现象。同时，肌肉力量是肌-骨健康的可靠评价标准之一，这一观点已被广泛接受和认同[38]。因此，根据本研究的结果以及前人研究中内侧腓肠肌形态学和肌力的显著正相关性的结果，可以推断男性可能有更好的肌-骨健康水平。

对于内侧腓肠肌的力学特性，本研究结果在男性的内侧腓肠肌垂直刚度较大，对数衰减值较小，这与 Blackburn 等人[39]的研究结果一致。女性的内侧腓肠肌刚度较低的原因可能是由于雌激素含量较高[40]。如先前的研究所述，垂直刚度较大的组织可以更快地传递力[41]，较低的对数衰减值意味着弹性较高，即机械能的消耗较少[26]。因此，推测男性的内侧腓肠肌可以收缩以产生更大的力量，将并将肌肉力量更快地传递到跟腱，与此同时，传递过程中的机械能损耗更小，这可能提示，在日常活动或运动中，男性的 gMTU 都具有更好的经济性。同时，男性内侧腓肠肌垂直刚度越高，说明跟腱在同等力条件下肌肉伸长量也越低。由于离心期或拉伸时拉伸过度是肌肉拉伤的主要机制[42]，根据本研究结果，在相同的肌力下，男性由于拉伸过度而造成的肌肉拉伤的风险可能较低。

正如所推测的结果，相比于女性，男性的跟腱长度更长，跟腱 CSA 更大。类似地。男性运动员的跟腱长度和 CSA 比女性运动员更长/大。男性较长的跟腱也可能与更好的身体素质和运动表现有关。Ueno 等人[11]发现次最大强度运动时，跟腱长度越长，能量消耗越少。因为相比于较短跟腱，较长的跟腱可以从地面反作用力中储存和释放更多的弹性能量。此外，男性跟腱的 CSA 显著大于女性。据前文的推测，在该 gMTU 中，主动收缩元，即内侧腓肠肌，在蹬伸期可以收缩，进而产生更大的力量，根据跟腱力计算公式[12]，这意味着在蹬伸时跟腱力更大。因此推测施加在男性跟腱上的力学负荷大于女性，即更多的胶原蛋白转换，这意味着男性跟腱的适应性肥大程度更大，即男性的跟腱 CSA 更大。以上有关 CSA 的结果提示：相比于女性，男性的跟腱的负荷承载能力更大，而若对跟腱施加相同的力，CSA 大的跟

腱则其应力较低,而应力是跟腱损伤的一个危险因素[12]。这提示,男性跟腱承受负荷的能力更强。然而,与假设不同的是,本研究未发现跟腱的力学特性具有显著的性别差异。这可能是由于测量的垂直刚度是垂直于跟腱的,不是沿着跟腱的方向,而该方向是跟腱持续承受高负荷的方向。综上,跟腱形态学特征的性别差异潜在提示,男性的跟腱可以储存和返回更多的弹性能量,并能够承受更高的负荷。

本研究将内侧腓肠肌和跟腱视为一个整体,首次探讨了亚裔的 gMTU 形态学和力学特性的性别差异,一定程度上弥补了该部分的研究缺陷。在本研究中,由于 gMTU 性别相关的形态学和力学特性的差异,本研究结果从形态学和生物力学的角度解释了女性的相对较差的身体素质或运动表现,并提示男性的踝关节周围的肌-骨系统更健康、男性跟腱承受负荷的能力更强,由于过度拉伸而造成的内侧腓肠肌拉伤率更小。由此,建议女性可以进行增强内侧腓肠肌羽状角、厚度、刚度和跟腱 CSA 的运动/训练(如离心运动/训练),以弥补女性身体素质和运动表现较差的弱势并防止损伤。本研究也存在一些局限性:①本研究中测量的垂直刚度为垂直于跟腱而不是沿着跟腱方向,在后续的研究中可以通过跟腱力-跟腱伸长量关系来计算沿跟腱方向的刚度;②本研究发现了男性和女性受试者的身高、体质量、腿长有显著性差异,但有前人研究认为腿长与肌肉形态学无显著相关性[15],且参考有关肌肉和肌腱形态学和力学特性的文章中并未做体质量、身高、腿长标准化,因此本研究也没有考虑身高、体质量、腿长等因素对 gMTU 的形态学和力学特性的性别差异的影响,未来研究可以进一步关注具有相同的体质量和身高男性和女性的 gMTU 形态学和力学特性是否具有性别差异;③本研究的受试对象为健康年轻人,因此所得结果也仅限于此类人群。

4 结 论

本研究发现在不规律运动和无训练习惯的成年人中,内侧腓肠肌的形态学和力学特性以及跟腱的形态学存在明显的性别差异。其中,男性的内侧腓肠肌羽状角、厚度、垂直刚度且、CSA 更大且跟腱长度更长,内侧腓肠肌对数衰减值更小。据此,内侧腓肠肌-跟腱复合体的形态学和力学特性具有显著性别差异,一定程度上解释了男性具有更好的身体素质和运动表现的原因,潜在反映男性内侧腓肠肌-跟腱复合体损伤风险更小。

参考文献

[1] 张希妮,王俊清,傅维杰. 跟腱运动功能与生物力学特征的研究进展[J]. 医用生物力学,2019,34(1):103-109. (ZHANG Xini, WANG Junqing, FU Weijie. Research advancements in motor function and biomechanical characteristics of achilles tendon[J]. Journal of medical biomechanics, 2019, 34 (1): 103-109 (in Chinese)).

[2] CHANG T T, LI Z, WANG X Q, et al. Stiffness of the gastrocnemius-achilles tendon complex between amateur basketball players and the non-athletic general population[J]. Frontiers in physiology, 2020, 11:606706.

[3] GREEN B, PIZZARI T. Calf muscle strain injuries in sport: A systematic review of risk factors for injury[J]. British journal of sports medicine, 2017, 51(16):1189-1194.

[4] SERGOT L, LEAPER O, ROLLS A, et al. Navigating the complexity of calf injuries in athletes: A review of MRI findings[J]. Acta radiol, 2021, 5: 38-43.

[5] HAMNER S R, SETH A, DELP S L. Muscle contributions to propulsion and support during running[J]. Journal of biomechancis, 2010, 43(14):2709-2716.

[6] 牛昊,马秀丽,周军. MRI 在小腿三头肌运动损伤中的应用价值[J]. 临床放射学杂志,2018,37(2):294-298. (NIU Hao, MA Xiuli, ZHOU Jun. Application value of MR in diagnosis of calf triceps injury[J]. Journal of clinical radiology, 2018, 37(2):294-298 (in Chinese)).

[7] JÄRVINEN T A, KANNUS P, PAAVOLA M, et al. Achilles tendon injuries[J]. Current opinion in rheumatology, 2001, 13(2):150-155.

[8] 张希妮,王俊清,杨洋,等. 基于跑姿控制训练模式下的跟腱生物力学研究[J]. 体育科学,2019,39(4):63-70. (ZHANG Xini, WANG Junqing, YANG Yang, et al. Effects of simulated barefoot running on achilles tendon mechanical properties[J]. China sport science, 2019, 39(4):63-70 (in Chinese)).

[9] TIMMINS R G, BOURNE M N, SHIELD A J, et al. Short biceps femoris fascicles and eccentric knee flexor weakness increase the risk of hamstring injury in elite football (soccer): A prospective cohort study[J]. British journal of sports medicine, 2016, 50(24): 1524-1535.

[10] KUMAGAI K, ABE T, BRECHUE W F, et al. Sprint performance is related to muscle fascicle length in male 100-m sprinters[J]. Journal of applied physiology, 2000, 88(3):811-816.

[11] UENO H, SUGA T, TAKAO K, et al. Relationship between achilles tendon length and running performance in well-trained male endurance runners[J]. Scandinavian journal of medicine & science in sports, 2018, 28(2):446-451.

[12] DENG L, ZHANG X, XIAO S, et al. Changes in the plantar flexion torque of the ankle and in the morphological characteristics and mechanical properties of the achilles tendon after 12-week gait retraining[J]. Life (basel), 2020, 10(9):159.

[13] ARAMPATZIS A, DE MONTE G, KARAMANIDIS K, et al. Influence of the muscle-tendon unit's mechanical and morphological properties on running economy[J]. Journal of experimental biolo-

gy,2006,209(17):3345-3357.
[14] ŠTEFAN L,PARADŽIK P,SPORIŠ G. Sex and age correlations of reported and estimated physical fitness in adolescents[J]. PLoS One,2019,14(7):e0219217.
[15] CHOW R S,MEDRI M K,MARTIN D C,et al. Sonographic studies of human soleus and gastrocnemius muscle architecture: Gender variability[J]. European journal of applied physiology,2000,82(3):236-244.
[16] DANIELS J,DANIELS N. Running economy of elite male and elite female runners[J]. Medicine science sports exercise,1992,24(4):483-489.
[17] LEPERS R. Sex difference in triathlon performance[J]. Frontiers in physiology,2019,10:973.
[18] MARQUES A,HENRIQUES-NETO D,PERALTA M,et al. Field-based health-related physical fitness tests in children and adolescents:A systematic review[J]. Frontiers in pediatrics,2021,9:640028.
[19] FIELDS K B,RIGBY M D. Muscular calf injuries in runners[J]. Current sports medicine reports,2016,15(5):320-324.
[20] CHAN J J,CHEN K K,SARKER S,et al. Epidemiology of Achilles tendon injuries in collegiate level athletes in the United States[J]. International orthopaedics,2020,44(3):585-594.
[21] KVIST M. Achilles tendon injuries in athletes[J]. Sports medicine,1994,18(3):173-201.
[22] 王俊清,张希妮,罗震,等. 步频再训练对跑步时下肢冲击的生物力学影响研究[J]. 应用力学学报,2020,37(5):2167-2175. (WANG Junqing,ZHANG Xini,LUO Zhen,et al. The influence of cadence retraining on impact forces and lower extremity biomechanics during running[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(5):2167-2175 (in Chinese)).
[23] NOLAN L,PATRITTI B L,STANA L,et al. Is increased residual shank length a competitive advantage for elite transtibial amputee long jumpers? [J]. Adapted physical activity quarterly,2011,28(3):267-276.
[24] GEREMIA J M,BARONI B M,BINI R R,et al. Triceps surae muscle architecture adaptations to eccentric training[J]. Frontiers in physiology,2019,10:1456.
[25] 刘海瑞,傅维杰,伍勰,等. 单腿落地时优势腿与非优势腿的生物力学偏侧性研究[J]. 体育科学,2014,34(8):70-76. (LIU Hairui,FU Weijie,WU Xie,et al. Biomechanics research on laterality effect between dominat and nondominant leg during single lege landing[J]. China sport science,2014,34(8):70-76 (in Chinese)).
[26] KOCUR P,WILSKI M,GOLIWAS M,et al. Influence of forward head posture on myotonometric measurements of superficial neck muscle tone, elasticity, and stiffness in asymptomatic individuals with sedentary jobs[J]. Journal of manipulative and physiological therapeutics,2019,42(3):195-202.
[27] HUANG J,QIN K,TANG C,et al. Assessment of passive stiffness of medial and lateral heads of gastrocnemius muscle, Achilles tendon,and plantar fascia at different ankle and knee positions using the MyotonPRO[J]. Medical science monitor,2018,24:7570-7576.
[28] FENG Y N,LI Y P,LIU C L,et al. Assessing the elastic properties of skeletal muscle and tendon using shearwave ultrasound elastography and MyotonPRO[J]. Scientific reports,2018,8(1):17064.
[29] KO C Y,CHOI H J,RYU J,et al. Between-day reliability of MyotonPRO for the non-invasive measurement of muscle material properties in the lower extremities of patients with a chronic spinal cord injury[J]. Journal of biomechanics,2018,73:60-65.
[30] SHAVANDI N,TALEBIAN S,ASLANPOOR S,et al. The effect of strength training and combination technique on preserving the strength of plantar flexor muscles after a period of detraining[J]. Journal of sports medicine and physical fitness,2016,56(9):990-996.
[31] ABE T,BRECHUE W F,FUJITA S,et al. Gender differences in FFM accumulation and architectural characteristics of muscle[J]. Medicine and science in sports and exercise,1998,30(7):1066-1070.
[32] STENROTH L,PELTONEN J,CRONIN N J,et al. Age-related differences in Achilles tendon properties and triceps surae muscle architecture in vivo[J]. Journal of applied physiology,2012,113(10):1537-1544.
[33] PEARSON M B,BASSEY E J,BENDALL M J. Muscle strength and anthropometric indices in elderly men and women[J]. Age and ageing,1985,14(1):49-54.
[34] FUJIWARA K,ASAI H,TOYAMA H,et al. Changes in muscle thickness of gastrocnemius and soleus associated with age and sex[J]. Aging clinical and experimental research,2010,22(1):24-30.
[35] LEE H J,LEE K W,LEE Y W,et al. Correlation between cycling power and muscle thickness in cyclists[J]. Clinical anatomy,2018,31(6):899-906.
[36] CORATELLA G,LONGO S,RAMPICHINI S,et al. Quadriceps and gastrocnemii anatomical cross-sectional area and vastus lateralis fascicle length predict peak-power and time-to-peak-power[J]. Research quarterly for exercise and sport,2020,91(1):158-165.
[37] STOREY A,SMITH H K. Unique aspects of competitive weightlifting: performance, training and physiology[J]. Sports medicine,2012,42(9):769-790.
[38] MORGAN G,MARTIN R,WELCH H,et al. Objective assessment of stiffness in the gastrocnemius muscle in patients with symptomatic Achilles tendons[J]. BMJ open sport & exercise medicine,2019,5(1):e000622.
[39] BLACKBURN J T,PADUA D A,WEINHOLD P S,et al. Comparison of triceps surae structural stiffness and material modulus across sex[J]. Clinical biomechanics,2006,21(2):159-167.
[40] BELL D R,BLACKBURN J T,NORCROSS M F,et al. Estrogen and muscle stiffness have a negative relationship in females[J]. Knee surg sports traumatol arthrosc,2012,20(2):361-367.
[41] WAUGH C M,KORFF T,FATH F,et al. Rapid force production in children and adults:Mechanical and neural contributions[J]. Medicine science sports exercise,2013,45(4):762-771.
[42] YU B,LIU H,GARRETT W E. Mechanism of hamstring muscle strain injury in sprinting[J]. Journal of sport and health science,2017,6(2):130-132.

(编辑　张璐)